АДАПТИВНЫЕ ПСЕВДОЛИНЕЙНЫЕ КОРРЕКТОРЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

М.В. Скороспешкин

Томский политехнический университет
E-mail: werberg@aics.ru

Предложены адаптивные псевдолинейные амплитудный и фазовый корректоры динамических свойств систем автоматического регулирования. Проведено исследование свойств систем автоматического регулирования с адаптивными корректорами. Показана эффективность применения псевдолинейных адаптивных корректоров в системах автоматического регулирования с нестационарными параметрами.

В системах автоматического регулирования объектами, свойства которых изменяются с течением времени, необходимо обеспечить целенаправленное изменение динамических характеристик регулирующего устройства. В большинстве случаев это осуществляется изменением параметров пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов). Такие подходы описаны, например, в [1, 2], однако реализация этих подходов связана либо с идентификацией, либо с использованием специальных методов, основанных на вычислениях по кривой переходного процесса. Оба эти подхода требуют значительного времени на подстройку.

В настоящей работе приводятся результаты исследования свойств систем автоматического регулирования с ПИД-регулятором и последовательными адаптивными амплитудным и фазовым псевдолинейными корректорами динамических характеристик. Такой способ адаптации характеризуется тем, что в процессе работы системы регулирования параметры регулятора не меняются и соответствуют настройке, предшествующей запуску системы в работу. В процессе работы системы регулирования, в зависимости от типа используемого корректора, меняется коэффициент передачи корректора или создаваемый им фазовый сдвиг. Эти изменения происходят только в тех случаях, когда возникают колебания регулируемой величины, связанные с изменением свойств объекта управления или из-за воздействия на объект управления возмущений. А это позволяет обеспечить устойчивость системы и повысить качество переходных процессов.

Выбор псевдолинейных корректоров для реализации адаптивной системы объясняется следующим. Корректоры, используемые для изменения динамических свойств систем автоматического регулирования, можно разбить на три группы: линейные, нелинейные и псевдолинейные [3–5]. Основной недостаток линейных корректоров связан с

тем, что изменение его параметров влияет как на амплитудные, так и фазовые частотные характеристики. В этом случае, добиваясь необходимой фазовой частотной характеристики (ФЧХ), можно получить амплитудную частотную характеристику (АЧХ), возрастающую в области средних и высоких частот, что приводит к уменьшению запаса устойчивости системы автоматического регулирования (САР). И наоборот, имея необходимую АЧХ, можно получить ФЧХ разомкнутой системы, принимающую отрицательное значение близкое к π-рад, что также существенно снижает запас устойчивости.

Как показали проведенные и представленные в [6] исследования, процедура адаптации линейных корректоров даже при использовании современного математического аппарата, например нечеткой логики, возможна лишь при ограниченных по диапазону и характеру изменениях параметров объекта управления. Применение нелинейных корректоров связано с проблемой учета зависимости частотных характеристик от амплитуды гармонических колебаний.

Синтез адаптивных корректоров динамических характеристик в классе псевдолинейных устройств связан с тем, что эти устройства позволяют получать требуемые амплитудные и фазовые частотные характеристики. Обычно эти устройства имеют два канала, амплитудный и фазовый, настраиваемые независимо от друга [5]. При этом частотные характеристики псевдолинейных корректирующих устройств не зависят от амплитуды гармонических колебаний.

Среди псевдолинейных широкое распространение нашли фазовые, амплитудные и амплитудно-фазовые корректоры [5]. Проведенные исследования показали, что амплитудные корректоры являются наиболее эффективными для реализации адаптивных систем. Эти корректоры в статическом режиме не оказывают влияния на свойства системы. Но при наличии колебаний регулируемой величины они уменьшают коэффициент передачи без заметного изменения фазового сдвига. Применение этих корректоров позволяет обеспечить требуемое качество систем автоматического регулирования в широком диапазоне изменения параметров объекта управления и характера возмущающих воздействий. Такой корректор можно рассматривать как дополнительное средство, участвующее в формировании управляющего воздействия и повышающее качество управления.

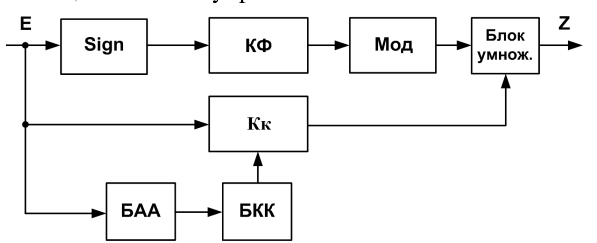


Рис. 1. *Структурная схема адаптивного амплитудного корректора*

Структура адаптивного амплитудного корректора, предложенного в [7] и исследуемого в настоящей работе, изображена на рис. 1. Данный корректор включается последовательно с регулятором.

На рисунке использованы следующие обозначения: E – входной сигнал корректора; Sign – блок определения знака; КФ – корректирующий фильтр; Мод – блок выделения модуля; Z – выходной сигнал корректора; Кк – статический коэффициент передачи корректора; БАА – блок анализа амплитуды ошибки САР; БКК – блок коррекции коэффициента корректирующего фильтра.

Данный корректор выполнен на базе псевдолинейного фильтра, которому кроме амплитудного ослабления (частотной адаптации), состоящей в подавлении высоких частот, придано дополнительно свойство параметрической адаптации.

Параметрическая адаптация осуществляется путем изменения статического коэффициента передачи корректирующего фильтра, представляющего собой линейное динамическое звено. В большинстве случаев это апериодическое звено первого порядка. Если использовать в качестве корректирующего фильтра звено с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1}, \qquad (1)$$

где K – статический коэффициент передачи звена, T – постоянная времени звена, то амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) корректора при K=1, полученная в результате гармонической линеаризации, будет иметь вид:

$$W(j\omega) = a + jb,$$

где

$$a = \frac{8}{\pi^2 \cdot \sqrt{1+T^2\omega^2}} \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\cdot\cos(2\theta)\right);$$

$$b = \frac{8}{\pi^2 \cdot \sqrt{1+T^2\omega^2}} \cdot \left(\frac{1}{3}\cdot\sin(2\theta)\right);$$

$\theta = -\mathrm{arctg}\,\omega T$; ω – угловая частота гармонических колебаний.

Анализируя аналитически представленную АФЧХ можно показать, что при изменении частоты амплитудно-частотная характеристика корректора меняется от значения, равного K, до нуля. А изменение фазовой частотной характеристики при различных параметрах корректирующего фильтра происходит не более чем на –20°. Притом, что максимальный фазовый сдвиг апериодического звена первого порядка (1), может достигать –90°. Работает корректор следующим образом. При возникновении в САР колебаний выходной величины объекта регулирования автоматически производится уменьшение коэффициента передачи корректора. Это происходит в результате перемножения сигналов верхней и средней ветвей.

Рассмотрим случай, когда K=1. В этом случае коэффициент передачи гармонического сигнала верхней ветви корректора будет меньше единицы. А, сле-

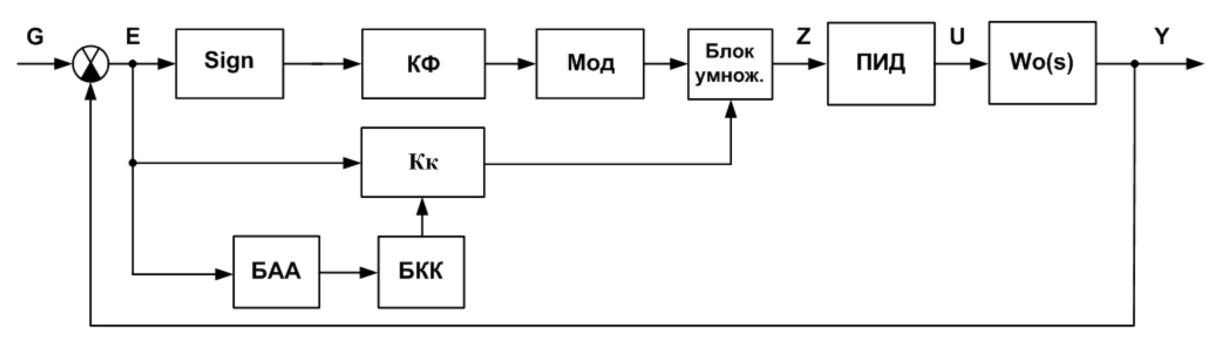


Рис. 2. Структурная схема САР с адаптивным амплитудным псевдолинейным корректором

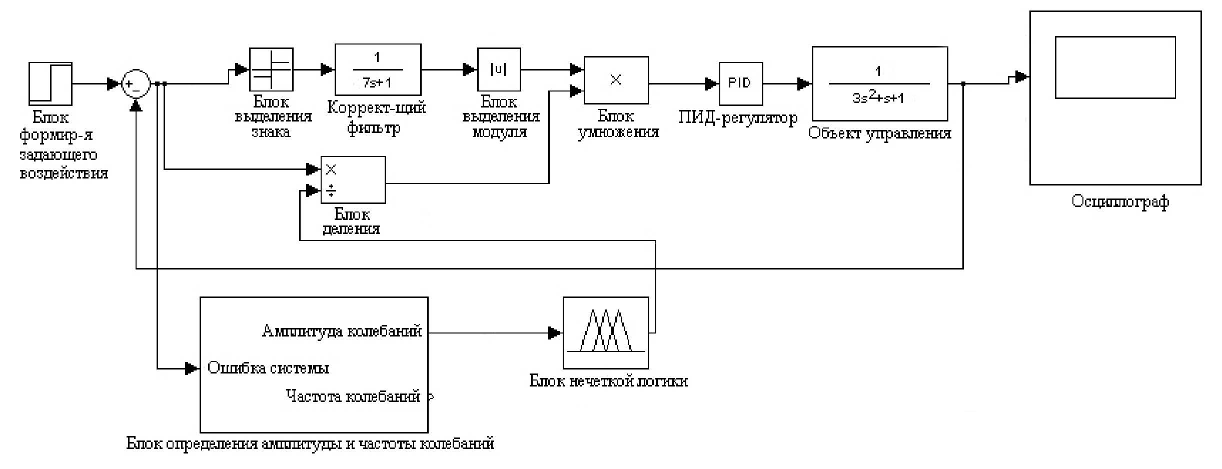


Рис. 3. Модель системы регулирования с адаптивным амплитудным псевдолинейным корректором

довательно, меньше единицы будет и коэффициент передачи корректора в целом. Причем, с увеличением частоты коэффициент передачи будет уменьшаться. В случаях, когда изменение коэффициента передачи не обеспечивает устранение колебаний, автоматически осуществляется изменение коэффициента передачи средней ветви корректора. Это производится блоком коррекции коэффициента корректирующего фильтра по значению амплитуды ошибки, определенной в блоке анализа амплитуды ошибки САР. Механизм адаптации может быть, например, линейным или квадратичным. Изменение коэффициента передачи может также осуществляться на основе аппарата нечеткой логики [6].

На рис. 2 приведена структурная схема системы автоматического регулирования с адаптивным амплитудным псевдолинейным корректором.

На рис. 2 использованы обозначения: G – задающее воздействие системы регулирования; U – управляющее воздействие; Y – выход объекта регулирования; $Wo(s)$ – передаточная функция объекта регулирования.

Исследование свойств системы с адаптивным корректором проводилось в программном пакете MATLAB 6.5. На рис. 3 представлена модель системы регулирования с адаптивным амплитудным корректором, выполненная в MATLAB. Изменение статического коэффициента передачи корректора производилось с помощью аппарата нечеткой логики. Дефазификация производилась с применением метода центра массы. Процедуры определения амплитуды колебаний ошибки и реализации нечеткой логики выполнены в виде отдельных блоков.

Моделирование систем автоматического регулирования проводилось для объектов первого, второго и третьего порядка. На рис. 4 представлены кривые переходных процессов на единичное ступенчатое задающее воздействие в системах регулирования только с ПИД-регулятором и ПИД-регулятором, дополненным последовательно включенным в цепь регулирования псевдолинейным амплитудным корректором. Эти кривые наглядно иллюстрируют способность адаптации системы регулирования к изменению параметров объекта регулирования.

Объект управления моделировался звеном второго порядка с передаточной функцией вида:

$$Wo(s) = \frac{Ko}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1},$$

где Ko – статический коэффициент передачи объекта регулирования, T_1 и T_2 – постоянные времени объекта регулирования.

Кривая 1 показывает характер переходного процесса на единичное ступенчатое воздействие САР с ПИД-регулятором без корректора при начальной настройке регулятора, выполненной по методу Циглера-Никольса. Кривая 2 соответствует САР с ПИД-регулятором и корректором при начальной настройке регулятора и корректора. Кривые 3 и 4 характеризуют соответствующие переходные про-

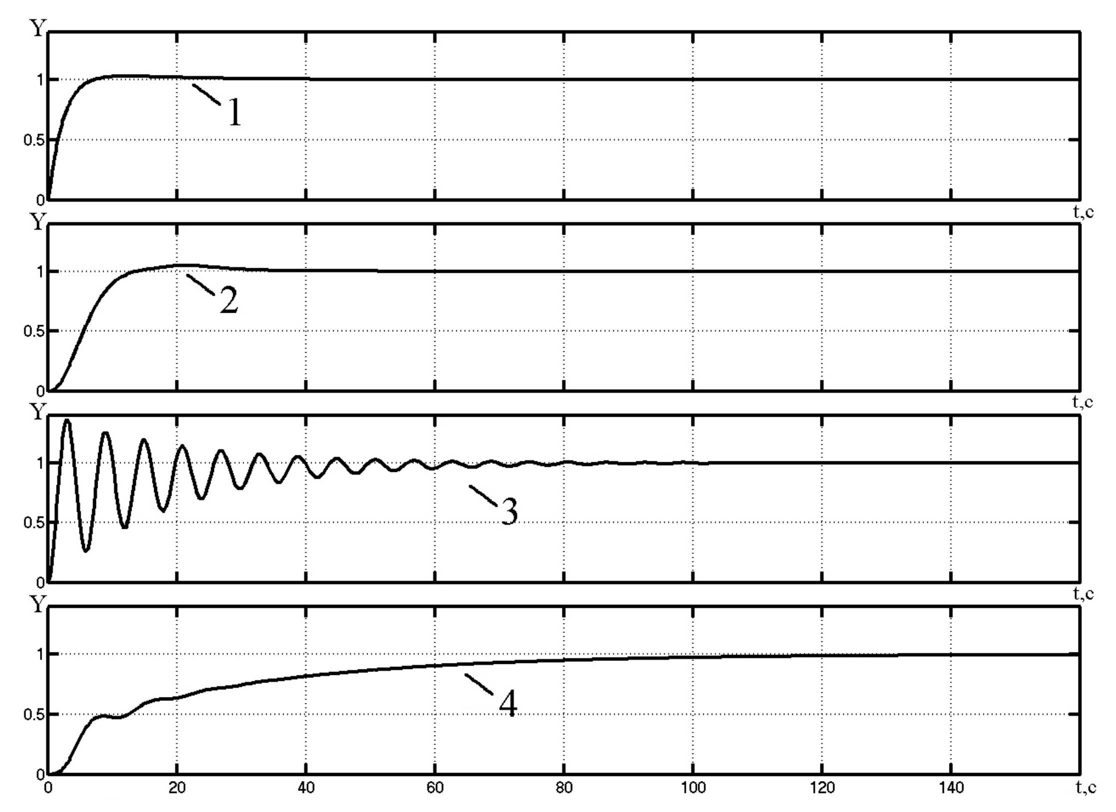


Рис. 4. *Кривые переходных процессов на единичное ступенчатое воздействие САР с амплитудным корректором*

цессы после изменения статического коэффициента передачи объекта регулирования с 10 до 1, а постоянной времени T_2 с 20 до 1 с. Значение T_1^2 принималось равным 3 с. При этом коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования регулятора, соответственно равные *Kp*=2,4249, *Ti*=5,89, *Td*=0,5419, не менялись. Вид кривой 4 говорит о том, что качество САР с корректором значительно лучше, чем без корректора (кривая 3), при изменившихся параметрах объекта регулирования.

Альтернативой амплитудному адаптивному псевдолинейному корректору является адаптивный фазовый корректор [8], который выполнен на базе интегро-дифференцирующего звена (ИДЗ) с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{Ts+1}{T_1 s+1},$$

где T_1 и T – постоянные времени ИДЗ.

На рис. 5 приведена структурная схема псевдолинейного адаптивного фазового корректора.

На рис. 5 использованы обозначения: БААЧ – блок анализа амплитуды и частоты гармонических колебаний; БКФ – блок коррекции фазового сдвига.

Коэффициенты гармонической линеаризации данного корректора имеют вид:

$$a = \frac{1}{\pi}(\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha); \quad b = \frac{1}{\pi}(1 - \cos 2\alpha), \qquad (2)$$

где $\alpha = \operatorname{arctg}\frac{\omega T(1-v)}{1+\omega^2 T^2 v}; \quad v = \frac{T_1}{T}.$

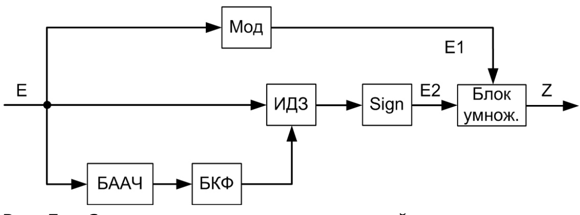


Рис. 5. *Структурная схема псевдолинейного адаптивного фазового корректора*

Анализ частотных характеристик корректора показывает, что при изменении частоты и варьировании постоянных времени звена от 1 до 0,01 с, от 1 до 10 с, фазовая характеристика претерпевает изменения в пределах от 0 до 78°, а логарифмическая АЧХ изменяется в пределах от 0 до –4 дБ. Такое изменение АЧХ не оказывает существенного изменения на запас устойчивости САР.

Данный корректор осуществляет фазовый сдвиг, величина которого зависит от значения постоянных времени T и T_1. Входной сигнал, разветвляясь, проходит по трем каналам. Верхний канал обеспечивает выделение абсолютного значения ошибки, средний канал состоит из интегро-дифференцирующего звена, блока определения знака и блока умножения. Нижний канал обеспечивает определение амплитуды и частоты колебаний на входе корректора и изменение фазового сдвига интегро-дифференцирующего звена путем коррекции постоянной времени T. Сигнал на выходе корректора Z равен произведению выходных сигналов верхнего E1 и среднего E2 каналов.

При возникновении в САР колебаний регулируемой величины, а следовательно, и ошибки, в корректоре автоматически происходит увеличение постоянной времени T, что приводит к увеличению v (2), а это, в свою очередь обеспечивает подъём ФЧХ. Данное свойство подтверждает анализ ФЧХ корректора, имеющей вид:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\frac{1}{\pi}(1-\cos 2\alpha)}{\frac{1}{\pi}(\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)}.$$

Другими словами, происходит подавление колебаний путем подъема фазовой частотной характеристики САР.

Определение постоянной времени, обеспечивающей необходимую коррекцию фазового сдвига, происходит в блоке БКФ по решающему правилу, представленному в виде кусочно-линейной функции и полученному на основе семейства ФЧХ интегро-диффиренцирующего звена, соответствующих различным значениям постоянной времени T. Процедура формирования решающего правила основана на построении кусочно-линейной функции, устанавливающей связь между постоянной времени T, обеспечивающей максимальный подъем ФЧХ, и частотой гармонических колебаний, поступающих на вход корректора [6].

Адаптивный псевдолинейный фазовый корректор, также как и амплитудный, включается последовательно в канал регулирования. Исследования свойств фазового корректора проводилось на примере САР объектами первого и второго порядка.

На рис. 6 представлены кривые переходного процесса на единичное ступенчатое воздействие в системах регулирования с ПИД-регулятором и псевдолинейным фазовым корректром. Кривая 1 характеризует переходный процесс в САР с ПИД-регулятором без корректора, а кривая 2 с ПИД-регулятором и корректором. Исследовалась САР с тем же объектом, что и в рассмотренном выше случае.

Параметры передаточной функции объекта управления соответствуют параметрам, определяющим кривую переходного процесса 3, представленную на рис. 4. При этом параметры регулятора не менялись. Таким образом, кривые переходного процесса, представленные на рис. 6, характеризуют также возможность адаптивного управления и с применением псевдолинейного фазового корректора.

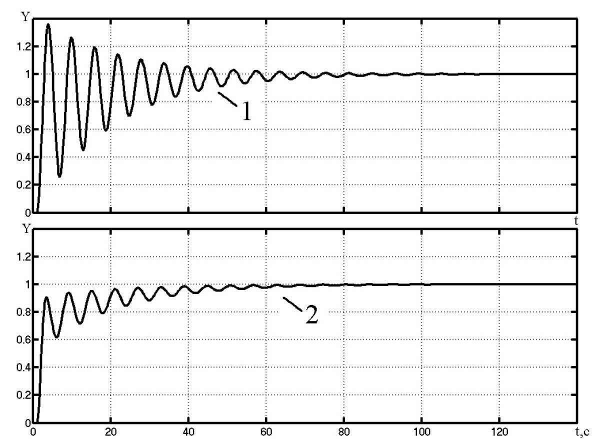


Рис. 6. *Кривые переходных процессов на единичное ступенчатое воздействие САР с фазовым корректором*

При практическом использовании описанных корректоров возникает вопрос о том, в каких случаях целесообразно использовать амплитудный корректор, а в каких фазовый. Результаты исследования показали, что фазовый корректор наиболее эффективен в тех системах автоматического регулирования, в которых требуется обеспечить высокое быстродействие. Это связано с тем, что в случае применения амплитудного корректора одновременно с уменьшением коэффициента передачи корректора снижается быстродействие системы регулирования, так как уменьшение коэффициента передачи корректора, приводит к уменьшению коэффициента передачи разомкнутой системы, а следовательно к уменьшению быстродействия. В то же время амплитудный корректор позволяет обеспечить требуемое качество САР приблизительно в 2...2,5 раза бо́льшем диапазоне изменения параметров объекта управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатов В.В., Ухаров П.Е. Адаптивная настройка систем управления с ПИД-регуляторами в условиях информационной неопределенности // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 8. – С. 16–20.
2. Штейнберг Ш.Е., Залуцкий И.Е., Сережин Л.П., Варламов И.Г. Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – № 10. – С. 43–47.
3. Хлыпало Е.И. Расчет и проектирование нелинейных корректирующих устройств в автоматических системах. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 272 с.
4. Зельченко В.Я., Шаров С.Н. Нелинейная коррекция автоматических систем. – Л.: Судостроение, 1981. – 167 с.
5. Методы автоматизированного проектирования нелинейных систем / Под ред. Ю.И. Топчеева. – М.: Машиностроение, 1993. – 576 с.
6. Скороспешкин М.В. Адаптивный линейный нечеткий корректор динамических свойств систем автоматического регулирования // Современные техника и технологии: Труды XII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 27-31 марта 2006 г. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2006. – Т. 2. – С. 162–165.
7. Скороспешкин М.В. Цифровой адаптивный корректор динамических характеристик САР с амплитудным ослаблением // Наука. Технологии. Инновации: Матер. Всеросс. научной конф. молодых ученых. – 8–11 декабря 2005 г. – Новосибирск: НГТУ, 2005. – С. 35–36.
8. Скороспешкин М.В. Цифровой адаптивный фазовый корректор динамических характеристик систем автоматического регулирования. // Современные проблемы математики и вычислительной техники: Матер. IV Респ. научной конф. молодых ученых и студентов. – 28–30 сентября 2005 г. – Брест: УО «БГТУ», 2005. – С. 108–110.